計算状態図を活用した硫化物形態制御型 AISI12L14代替鉛フリー低炭素硫黄快削鋼

村上俊之^{*1)} 白神哲夫^{*2)} 三瓶哲也^{*3)}
及川勝成^{**} 石田清仁^{***}

1. はじめに

AISI12L14 (JIS SUM24L) は Pb が 0.3%, S が 0.3% 添加された快削鋼で、自動車関連ではトランスミッション内での油圧制御部品や油圧ホースの口金として、また、OA 機器のシャフトにも多量に使用されている。地球環境問題から快削鋼の Pb フリー化が需要家に強く要望されているが、本快削鋼は鋼中酸素量がけた違いに多いため (150 ppm 程度)、機械構造用鋼対応で既に使われている Ca⁽¹⁾ や B⁽²⁾ による被削性の向上が困難であることから、別の手法を考える必要があった。そこで、著者らは、被削性向上元素として多量に添加されている S に着目した。従来より S 快削鋼について、硫化物系介在物が大きいほど被削性が向上することが知られている⁽³⁾。その観点から、硫化物系介在物の大型化による被削性向上を目的に検討を進めた。その際、硫化物に関する計算データベースの構築がマイクロアロイング技術の進歩に伴い急速に進展していることから、それを有効に活用した。

本技術開発では、最初に多元系の相平衡計算から状態図を求め、硫化物系介在物の大型化が期待できる成分系を予測した。その結果を基に、実際に試験溶解、被削性試験などの確認試験を実施し、成分系の決定を行い、新しい Pb フリー快削鋼を開発した。

2. 開発鋼の考え方

(1) 状態図計算による予測

被削性に関する硫化物系介在物は、溶鋼の凝固中に偏晶反応により晶出する⁽⁴⁾。硫化物系介在物の大型化を考えた場合、以下の方法が考えられる。

- ① 凝固段階で、硫化物系介在物を大きく晶出させる。
- ② 晶出後、鍛錬比を小さくする。

①の場合、凝固速度を遅くすることが一般的で、铸造断面形状を大きくするか、铸造時に緩冷却することが考えられる。しかし、いずれも現状の連続铸造法の中で大きく変化させることは難しい。一方、②の場合、同一サイズの圧延材を製造することを考えると铸造断面形状の小型化による鍛錬比の縮小が考えられるが、前述のように、铸造断面形状の小型化は铸造時の介在物サイズを小型化することにつながり、効果は小さい。そこで、著者らは、現状の連続铸造設備を用いて硫化物系介在物を大型化するには、硫化物系介在物が液相から晶出する温度域を拡大する成分系が有効であると考えた。

成分系検討にあたり、以下の理由から Cr に着目した。

- ① MnS に固溶し、硫化物の大型化が期待できる。
- ② (Cr, Mn)S も被削性を改善する。
- ③ 環境に有害な元素ではない。

また、成分系定量化の検討にあたっては、状態図を計算により求め、そこから硫化物系介在物の晶出温度域を予測した。状態図の計算には、多元系状態図計算に適した CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams) 法を用いて、Fe-C-S-Cr-Mn 状態図用の熱力学データベースを構築し⁽⁵⁾、状態図計算には Thermo-Calc を用いた。種々の成分値について計算を行ったが、S の単独増加や Cr の添加のみでは晶出温度域の大幅な増大は得られず、「Cr 添加 + S を増量」によって初めて晶出温度域が拡大することを見出した。本開発鋼成分系の計算状態図を現行鋼 AISI12L14 の計算結果と比較して図 1 に例示する。AISI12L14 の硫化物系介在物の晶出温度域は、19℃であるのに対し、本開発鋼の温度域は、93℃と 4 倍以

* エスケーケー条鋼株式会社

仙台製造所研究開発部：1) 主任部員 2) 部長
仙台製造所商品技術部：3) 部長

** 産業技術総合研究所東北センター基礎素材研究部門 機能性金属材料研究グループ：1) 主任研究員

*** 東北大学教授；大学院工学研究科材料物性学専攻
A Sulfide Shape Controlled Free Cutting Low Carbon Steel Without Lead Addition to replace AISI12L14 Which Was Developed by Applying Thermodynamic Database for Sulfide; Toshiyuki Murakami*, Tetsuo Shiraga*, Tetsuya Sampei*, Katsunari Oikawa**, Kiyohito Ishida*** (*NKK BARS & SHAPES CO., LTD. **National Institute of Advanced Industrial Science and Technology. ***Tohoku University)
2003年11月1日受理

図1 計算された状態図の例(左：開発鋼，右：AISI12L14)。

図2 硫化物の生成量。

図3 熱間延性，被削性に及ぼす Mn, Cr 量の影響。

上に温度域が拡大している。

一方，検討の過程で，本開発鋼の硫化物の析出量についても計算した．図2に示すように硫化物の析出量が求まり，圧延再加熱時の硫化物の未固溶量が AISI12L14 に比べて，はるかに多いことがわかった．これが，圧延再加熱時のオーステナイト粒成長の抑制，あるいは，フェライト変態の核として機能し，圧延材ミクロ組織の細粒化に寄与することが予測された．ミクロ組織の細粒化は，硫化物系介在物の大型化と同様に，被削性を向上させる⁽⁶⁾．このような新たな知見についても計算によって初めて予測できたものと考えている．

(2) 実験溶解炉鋼による確認試験

計算で検討した成分系の中で，Pb フリー快削鋼の候補と考えられた成分系について，実際に試験溶解，被削性試験を行い，最終的な成分系の確認試験を行った．

供試材は，150 kg 真空溶解炉により，溶製，铸造した．鋼塊を1200℃に加熱後，直径 85 mm に熱間鍛造し，950℃の焼ならしを施した後に，被削性試験を実施した．なお，熱間鍛造材の表面割れ状況を観察し，熱間延性も評価した．被削性と熱間延性を Cr, Mn, S 濃度の関係としてまとめた例を図3に示す．図中には，同時に試験した比較鋼の結果も合わせて表記している．従来より知られているように硫化物系介在物が大型化している成分系は被削性が良好であり，その大型化に対して，状態図の計算から予測されたように，Cr 添加，ならびに，S 増量は必要であった．固相線温度から予測

図4 ミクロ組織の比較
(左：開発鋼，右：AISI12L14)。

された熱間延性に対しても低 Mn，低 Cr 領域で熱間鍛造割れが多発し，計算からの予測に一致していた．また，ミクロ組織については，1200℃に加熱し，直径 11.5 mm に圧延した線材のフェライト粒径を観察した．図4にミクロ組織を示す．本開発鋼成分系のフェライト粒径は，AISI12L14 に比べて小さい．図2の硫化物析出量の計算結果から予測されたように1200℃に加熱した状態で，本開発鋼成分系の未固溶の硫化物析出量は，AISI12L14 に比べてはるかに多く，その析出量の差が原因で，本開発鋼成分系のオーステナイト粒成長が抑制された，と考えられる．

以上，状態図の計算予測に基づいて実施した実験溶解炉鋼による確認試験により，Pb フリー快削鋼成分系として，1%Cr-0.4%S 鋼を決定した．

表1 開発鋼と AISI12L14 との化学組成比較(mass%).

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cr	Pb	O
開発鋼	0.05	tr.	0.58	0.076	0.385	1.00	tr.	0.0164
AISI12L14	0.07	tr.	1.05	0.070	0.340	0.08	0.24	0.0153

表2 開発鋼と AISI12L14 との機械的性質比較($\phi 85$).

鋼種	0.2%耐力	引張強さ	伸び	絞り
開発鋼	298 MPa	401 MPa	36%	57%
AISI12L14	289 MPa	409 MPa	30%	43%

図5 硫化物系介在物サイズの比較.

図6 逃げ面摩耗量の比較.

3. 開発鋼の特性(実炉溶製鋼)

(1) 成分例と機械的性質

表1, 2に実炉溶製鋼の化学成分例と機械的性質をそれぞれ示す. 機械的性質は AISI12L14 とほぼ同等である.

(2) 硫化物系介在物の比較

図5に硫化物系介在物の顕微鏡写真を示す. 硫化物系介在物の大きさは, これまで検討してきたように本開発鋼の方が大きくなっている.

(3) 被削性

被削性は以下に示すような条件下では, AISI12L14 と同等以上であることを確認した⁽⁷⁾.

- ① 超硬, コーティング超硬, サーメット工具での旋削加工性(工具寿命, および, 仕上げ面粗さ)
- ② ハイス工具での旋削加工性(工具寿命, および, 仕上

図7 ドリル摩耗量の比較.

げ面粗さ), および, 穴あけ加工性(工具寿命)

③ 切屑処理性

図6に超硬工具 P20 による旋削加工を行った時の切削時間と工具摩耗(逃げ面摩耗)量の関係を示す. AISI12L14 に比較して, 本開発鋼の工具摩耗の進行は緩やかで, 良好な旋削加工性となっている.

図7に直径 10 mm のハイスドリル SKH51 による穴あけ加工を行った時の穴あけ個数とドリル摩耗量の関係を示す. 旋削加工と同様に, AISI12L14 のドリル摩耗の進行が速く, 1450個を過ぎる頃から穴あけ時に異音を発生するようになり, 穴あけ継続が不可能になったのに対して, 本開発鋼にはそのような現象は認められず, 1500個以上の穴あけが可能であり, 良好な穴あけ加工性となっている.

(4) その他の特性

本開発鋼の浸炭性, メッキ性も AISI12L14 と同等である.

4. 実用化状況

本開発鋼は自動車油圧制御部品, ならびに, OA 機器のシャフトに既に採用されている. いずれの業界でもグリーン調達の動きが進んでおり, 今後とも適用分野, 数量の拡大が期待される.

5. 特 許

国内: 特開2003-226935ほか5件出願.

外国: PCT 出願(米国, 欧州, 韓国ほか5ヶ国指定), 台湾, マレーシア, タイに出願.

文 献

- (1) 大野 鐵: 西山記念技術講座, **96-97**(1984), 157.
- (2) 村上俊之, 白神哲夫: NKK 技報, No. 178(2002), 21.
- (3) L. H. Van Vlack: Trans. ASM, **45**(1953), 741.
- (4) 及川勝成, 大谷博司, 石田清仁, 西沢泰二: 鉄と鋼, **80**(1994), 623.
- (5) 及川勝成, 光井 啓, 石田清仁: 材料とプロセス, **16**(2003), 1516.
- (6) 白神哲夫: 材料とプロセス, **12**(1999), 961.
- (7) 村上俊之: 特殊鋼, **52**(2003), 22.